Como avaliar se um equipamento deve ou não ser substituído na perspectiva de um Gestor de Activos

Rui Assis (Eng.º Mec. Ph.D. IST)

Instituto de Soldadura e Qualidade
rassis@rassis.com
www.rassis.com
Nov-2013

Resumo

Num sistema reparável, as reparações consistem frequentemente na substituição ou recuperação de apenas uma pequena percentagem dos seus componentes. Este procedimento deixa o sistema num estado aproximadamente igual àquele em que se encontrava antes da intervenção. Nestas condições, devido à maior frequência de intervenções e à maior quantidade de peças substituídas (a quantidade de novos componentes necessários substituir aumenta com a idade de um equipamento e, por outro lado, alguns componentes vêm a sua vida progressivamente reduzida por influência do conjunto envelhecido), os tempos entre falhas TBF poderão já não ser independentes e uniformemente distribuídos (iid) – característica dos sistemas *Poisson* homogéneos (PH). Pelo contrário, estarão correlacionados e evidenciarão uma diminuição crescente, designando-se um tal sistema por *Poisson* não homogéneo (PNH). Pretende-se demonstrar, através de um exemplo, como o comportamento fiabilístico de um equipamento pode ser integrado numa análise de viabilidade económica, considerando os custos pertinentes estimados ao longo da sua vida restante – também estimada –, e concluir se o equipamento é já economicamente obsoleto ou, se não, dentro de quanto tempo o será e deverá ser substituído. Em suma, traduzir a "linguagem de Engenheiro" em "linguagem de Gestor".

Este exemplo ilustra uma parte das novas competências que os actuais "Responsáveis da Manutenção" deverão reunir, de modo a corresponderem à crescente procura de "Gestores de Activos Físicos" por parte de médias e grandes empresas industriais e de serviços de todo o mundo.

Palavras chave: Gestão de activos físicos, Processos Poisson não-homogéneos, Vida económica, Substituição de um equipamento, Modelo de Duane, Modelo AMSAA, CAPEX, OPEX

Introdução

As PAS 55-1:2008 e PAS 55-2:2008 (*Publicly Available Specification*) sobre *Asset Management*, em vigor na Grã-Bretanha desde 2008 (a ISO 55000 está prestes a sair) vieram mostrar à evidência a importância de as empresas desenvolverem:

"*systematic and coordinated activities and practices through which an organization optimally and sustainably manages its assets and asset systems, their associated performance, risks and expenditures over their life cycles for the purpose of achieving its organizational strategic plan, understood as "overall long-term plan for the organization that is derived from, and embodies, its vision, mission, values, business policies, stakeholder requirements, objectives and the management of its risk"".*

Segundo estas PAS, a Gestão de Activos comporta cinco componentes que devem ser geridos de forma holística: i) activos humanos; ii) activos de informação; iii) activos financeiros; iv) activos intangíveis (reputação, moral, propriedade intelectual, *goodwill*, etc.) e v) activos físicos. Todos estes activos se encontram interligados numa qualquer Organização, mas estas PAS são focadas na gestão de Activos Físicos.

A implementação de um sistema de Gestão de Activos requer uma abordagem que permita às Empresas e outras Instituições maximizar o valor dos serviços prestados à comunidade, atingindo os seus objectivos através da correcta gestão dos seus activos físicos ao longo dos seus ciclos de vida. Estes objectivos passam por decisões tais como, seleccionar apropriadamente esses activos, operá-los e mantê-los adequadamente e, no final de vida, renová-los ou descartá-los. Estas fases do ciclo de vida devem ser geridas, de acordo com princípios, tais como; i) Racionalidade económica (rentabilidade dos investimentos); ii) Ética institucional e ambiental; iii) Segurança para utilizadores e comunidade; iv) Crescimento sustentado; v) Planeamento a longo prazo; vi) Cumprimento de obrigações legais e contabilísticas; vii) Avaliação do risco de decisões; viii) Satisfação de clientes, colaboradores, fornecedores e accionistas.

Os seguintes elementos são considerados também essenciais para a implementação bem-sucedida destes princípios: i) Estrutura organizativa com capacidades de direcção, liderança e coordenação; ii) Colaboradores competentes, atentos e empenhados; iii) Informação adequada sobre o estado de condição dos activos, performance, riscos, custos e a sua inter-relação.

Embora os factores humanos, tais como liderança, motivação e cultura não sejam tratados de forma directa nestas PAS, são contudo críticos para o sucesso de uma gestão optimizada e sustentada dos activos físicos de uma Empresa ou outra Instituição.

Com efeito, as empresas ganham consciência de que os seus Activos Físicos (equipamentos e instalações) resultantes de enormes investimentos financeiros, devem ser melhor rentabilizados, isto é, os custos dos seus ciclos de vida (aquisição, Operação e Manutenção O&M e desactivação) devem ser minimizados. Esta perspectiva integrada operacional e estratégica força os Gestores operacionais a adquirir maiores competências para poderem justificar, em linguagem compreensível pela Gestão de topo, quer a razoabilidade dos custos operacionais decorrentes da adopção das políticas de manutenção mais adequadas, quer os investimentos visando melhorias de fiabilidade e de disponibilidade. As circunstâncias para aceitar decisões fundamentadas empiricamente estão condenadas a desaparecer. Em seu lugar, surge a obrigatoriedade da comprovação por métodos científicos – a estatística, as probabilidades, as técnicas de simulação em computador e o cálculo financeiro passam a ser ferramentas obrigatórias. Estes requisitos devem ser assegurados na fase de selecção e aquisição de um equipamento, pois dificilmente será técnica e/ou economicamente viável proceder a correcções *a posteriori*.

Segue-se a fase de exploração, durante a qual os custos de O&M são grandemente influenciados pelas políticas de manutenção adoptadas. Estas devem ser seleccionadas tendo em conta as condições reais de funcionamento e as consequências para a Organização das falhas que poderão ocorrer. As políticas de manutenção arrastam, por sua vez, as políticas de gestão dos sobressalentes e das peças de substituição.

Vem depois a fase de desactivação, a qual é função da eventual obsolescência tecnológica e/ou do seu estado de degradação.

Estas três fases devem obedecer a princípios de racionalidade económica, pelo que as análises das alternativas de decisão devem compreender métodos quantitativos que tenham em conta o valor temporal do dinheiro. É isso que pretendemos ilustrar através de um caso que interliga a fiabilidade (linguagem de Engenheiro) com a economia (linguagem de Gestor).

No que se segue, aproveitei muito do que já escrevi sobre este tema [2].

1. Custo do ciclo de vida (LCC – *Life Cycle Cost*)

A aquisição de um novo equipamento ou a transformação de um existente vai originar custos e proveitos específicos durante muitos anos (dizemos que influencia o médio/longo prazo). Constitui, todavia, prática generalizada e incorrecta esquecer aqueles factores e decidir apenas com base no preço de aquisição (custo do investimento à cabeça) mais baixo.

Sendo os recursos sempre escassos, é óbvio que devemos optar pela alternativa mais económica. Mas ser mais económico significa apresentar "o menor custo ao longo do ciclo de vida" e não "o menor investimento" – como diz o ditado: "O que é barato sai (muitas vezes) caro"! Uma decisão de investimento deve, pois, ser bem ponderada e todos os factores que poderão influenciar os resultados da exploração económica durante a vida útil estimada deverão ser equacionados.

O custo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost* – LCC) de um equipamento é composto por dois custos: o custo de propriedade e o custo de operação.

O custo de propriedade é igual, por sua vez, à soma dos seguintes custos originados, respectivamente, no início, no decurso e no fim do ciclo:

- Custos de aquisição e instalação;
- Custos de manutenção;
- Custos de desactivação e eliminação.

O custo de operação compreende unicamente os chamados "custos variáveis" dos recursos usados na produção de bens ou serviços, tais como, energia, consumíveis e mão-de-obra. Os custos de oportunidade [2] e [3] podem ser também aqui incluídos ou considerados numa terceira categoria.

A Figura 1 mostra esquematicamente a evolução destes custos ao longo do tempo de vida do equipamento (em *n* o equipamento é desactivado). Nela se pretende evidenciar que o custo do investimento é frequentemente o menor componente e que o custo de operação mais o custo de manutenção (rectângulos cinza escuro e cinza claro) é o maior.
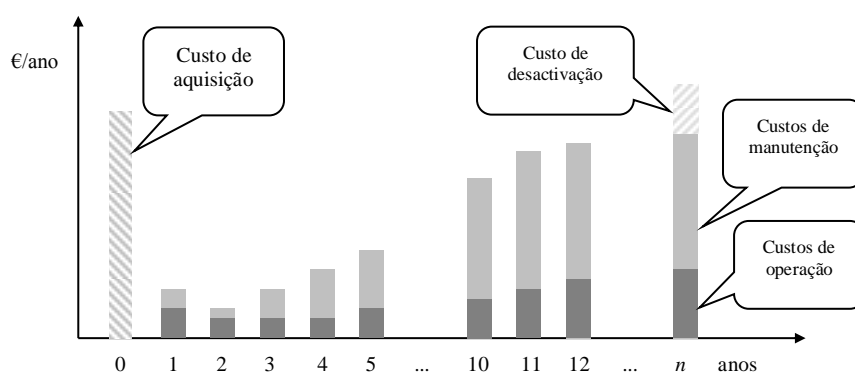
Figura* 1 – *Custos do ciclo de vida

Os custos de Operação e Manutenção (O&M) apresentam um comportamento típico, caracterizado por uma evolução temporal em forma de S; crescimento moderado nos primeiros anos, até um momento de inflexão ao qual se segue um crescimento com tendência para entrar em patamar. Por vezes, o primeiro

ano constitui uma excepção, devido a esforços de aprendizagem que compreendem algumas falhas devidas a erros de operação, as quais tendem a desaparecer com o acumular da experiência.

O custo de desactivação de um equipamento pode, por vezes, ser menor do que o valor da receita realizada com a sua eventual venda no mercado de usados, pelo que a diferença contribuirá para o decremento do custo do último ano de vida.

O conceito de custo do ciclo de vida é usado em estudos comparativos de alternativas de projectos de investimento, tais como, por exemplo, substituição de equipamentos, modificações de equipamentos e grandes reparações. Outras vezes, surgem situações em que se torna necessário realizar análises de compromisso ou de custo mínimo. Por exemplo, qual será a espessura de uma manga isolante térmica destinada a uma tubagem que minimiza a soma dos custos de propriedade (investimento + manutenção + desactivação) e de operação (perdas de energia) durante a vida útil?

2. Previsão de custos

Para justificar a substituição de um qualquer equipamento (principal ou auxiliar), temos pois de estimar os CAPEX[1] e OPEX[2], quer do *defender*[3] quer do *challenger*[4] ao longo da vida restante do primeiro e do ciclo de vida do segundo. Estas estimativas só podem realizar-se de uma de quatro formas:

1. Por informação dos fabricantes das horas de intervenção e das quantidades por referência das peças necessárias;
2. Por extrapolação de custos passados (se existirem) do equipamento em causa;
3. Por extrapolação do número de falhas do histórico registado no cadastro;
4. Por analogia com equipamentos semelhantes (próprios ou de parceiros de indústria).

No primeiro caso, bastar-nos-á multiplicar aquelas horas e quantidades de peças previstas para cada ano de utilização pelos correspondentes preços unitários na data de hoje se considerarmos os cálculos a preços constantes. Contudo, no segundo e quarto casos, teremos de efectuar um exercício prévio de ajustamento dos custos de cada ano de acordo com o(s) factor(es) de custo que mais terão influenciado a sua evolução temporal [2]. Felizmente, na grande maioria das vezes, esse factor é apenas a inflação verificada. De outro modo, teríamos de conhecer a evolução temporal do(s) factor(es) dominantes e ajustar os custos de cada ano do efeito ponderado daquele(s) factor(es). No terceiro caso, teremos de multiplicar o número previsto de falhas em cada ano pelo custo médio de uma falha (material + mão-de-obra) e adicionar os custos de manutenção preventiva de acordo com a política adoptada.

É este último caso que passamos a desenvolver, começando por teorizar a situação.

3. Sistemas *Poisson* Não Homogéneos

Num sistema reparável, as reparações consistem frequentemente na substituição ou recuperação de apenas uma pequena percentagem dos seus componentes. Este procedimento deixa o sistema num estado aproximadamente igual àquele em que se encontrava antes da intervenção.

Nestas condições, devido à maior frequência de intervenções e à maior quantidade de peças substituídas (a quantidade de novos componentes necessários substituir aumenta com a idade de um equipamento e, por outro lado, alguns componentes vêm a sua vida progressivamente reduzida por influência do conjunto envelhecido), os tempos entre falhas TBF poderão já não ser independentes e uniformemente distribuídos, isto é, o sistema já não será *Poisson* homogéneo (PH). Pelo contrário, os TBF estarão correlacionados e evidenciarão uma diminuição crescente. Um tal sistema designa-se por *Poisson* não homogéneo (PNH).

---

[1] OPEX – *OPerational EXpenditures*
[2] CAPEX – *CAPital EXpenditures*
[3] Equipamento actual
[4] Equipamento candidato

Para modelar este processo estocástico, definimos uma função de intensidade $\rho(t)$ como sendo a taxa de variação do número esperado de falhas $dE[N(t)]$ em relação ao tempo dt:

$$\rho(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \tag{1}$$

Uma estimativa natural de $\rho(t)$ pode ser aproximada por:

$$\rho(t) \approx \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{\Delta t} \tag{2}$$

A função de intensidade $\rho(t)$ pode também ser referida como taxa de renovação, intensidade de falha, taxa de degradação, ou taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate of OCurrence of Failures*).

Esta intensidade $\rho(t)$ não deve ser confundida com a função de risco (ou taxa instantânea de falhas) $h(t)$. Com efeito:

- $\rho(t)$ é uma probabilidade incondicional de ocorrer uma falha no intervalo Δt;
- $h(t)$ é uma probabilidade condicional de uma falha ocorrer no intervalo Δt, dado não ter ocorrido nenhuma até ao momento t (Expressão 2.5 e ponto 2.2.2 de [2]).

Com efeito, a função de risco $h(t)$ refere-se apenas à primeira falha, enquanto a função de intensidade $\rho(t)$ é uma taxa absoluta de falha dos sistemas reparáveis.

O número acumulado de falhas m ao longo do tempo pode ser descrito por uma função de potência da forma:

$$m(t) = a.t^{b} \tag{3}$$

Esta lei de potência é conhecida por modelo AMSAA[5].

Derivando esta função em relação ao tempo, obtemos a função de intensidade ρ no momento t ou $\rho(t)$:

$$\rho(t) = a.b.t^{b-1} \tag{4}$$

- Quando $b > 1$, o processo é PNH e a ROCOF cresce;
- Quando $0 < b < 1$, o processo é PNH e a ROCOF decresce;
- Quando $b = 1$, o processo é PH.

Se conhecermos como a função de intensidade ρ varia com t, podemos calcular quantas falhas poderão ocorrer dentro de qualquer intervalo de tempo $(t_i - t_{i-1})$.

$$m(t_i - t_{i-1}) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \rho(t)dt = a.\left(t_i^b - t_{i-1}^b\right) \tag{5}$$

O Quadro 1 compara os dois processos.

Quadro 1 – Comparação entre processos PH e PNH

Processos *Poisson* homogéneos (PH)	**Processos *Poisson* não-homogéneos (PNH)**
$\rho(t) = \lambda$	$\rho(t) = f(t)$
$R(t) = e^{-\lambda t}$	$R(t) = e^{\int_0^t \rho(t)dt}$
$m(t) = a.t$	$m(t) = a.t^b$

[5] *Army Material Systems Analysis Activity*

O MTTF no caso de um componente sob teste, ou o MTBF no caso de um equipamento sob manutenção, é variável ao longo do tempo, podendo calcular-se o seu valor instantâneo (no momento t) pela expressão:

$$\mathrm{MTBF}(t) = \frac{1}{\rho(t)} \tag{6}$$

Os parâmetros a e b podem ser estimados pelo método de regressão dos mínimos quadrados ou pelo método da máxima verosimilhança. Recorrendo a este último, devemos considerar duas circunstâncias:

1. Os dados são do Tipo I, ou seja, a análise é limitada pelo tempo T (idade do equipamento quando realizamos o estudo de viabilidade);
2. Os dados são do Tipo II, ou seja, a análise é limitada pelo tempo até à última falha t_n.

Vejamos as fórmulas aplicáveis para o cálculo dos parâmetros a e b. Nestas, t_i representa o momento em que se verifica a falha de ordem i, t_i - t_{i-1} representa o intervalo de tempo entre as falhas sucessivas de ordem i e de ordem i-1 e T representa o tempo total durante o qual o sistema sob teste foi observado.

3.1 Dados do Tipo I (teste limitado pelo tempo *T*)

Dados n momentos de falha sucessivos $t_1 < t_2 < ... < t_n$ que ocorreram durante o tempo T, podemos estimar os parâmetros a e b e deduzir $\rho(T)$ e MTTF a partir destes:

$$\hat{b} = \frac{n}{n.\ln(T) - \sum_{1}^{n} \ln(t_i)} \tag{7}$$

$$\hat{a} = \frac{n}{T^{\hat{b}}} \tag{8}$$

$$\hat{\rho}(T) = \hat{a}.\hat{b}.T^{\hat{b}-1} \tag{9}$$

$$\mathrm{MTTF} = \frac{1}{\hat{\rho}(T)} \tag{10}$$

3.2 Dados do Tipo II (teste limitado pelo tempo até à última falha t_n)

Neste caso, os parâmetros a e b são calculados diferentemente.

$$\hat{b} = \frac{n}{(n-1).\ln(t_n) - \sum_{1}^{n-1} \ln(t_i)} \tag{11}$$

$$\hat{a} = \frac{n}{t_n^{\hat{b}}} \tag{12}$$

4. **Exemplo de aplicação** (adaptado do ponto 17.6 da pág. 424 de [1])

Suponhamos a seguinte situação:

Um robot de soldadura funciona há 5 anos e a sua vida útil é estimada em mais 5 anos. Este robot (*defender*) apresenta actualmente uma frequência de falhas elevada. Cada falha origina uma paragem cujo custo médio é de 550 € (custos de oportunidade devidos a produção perdida e custos de reparação: materiais e mão-de-obra). O seu valor venal actual é de 12.000 € e a depreciação deste valor é estimada em 20% ano.

Um novo robot (*challenger*) custa actualmente 40.000 € e a depreciação deste valor é estimada também em 20% ano. A sua vida útil é estimada em 10 anos.

O regime médio de trabalho do robot é de 8 horas/dia e 240 dias/ano e assim prevemos que se mantenha nos próximos anos.

O cadastro do robot mostra a ocorrência de 30 falhas desde a sua aquisição até hoje (momento da ocorrência da última falha). Os tempos acumulados de funcionamento até cada falha encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Tempos acumulados até cada falha (horas)

1.339	1.857	2.307	3.329	3.792
3.891	5.541	5.646	5.726	5.806
6.530	6.736	6.771	6.826	7.056
7.065	7.097	7.771	7.779	7.942
8.045	8.088	8.558	8.642	8.764
8.958	9.034	9.104	9.318	9.523

a) Qual o valor do MTBF que o robot apresenta na data de hoje?
b) Para uma taxa real de actualização de 15% ano, quando será economicamente viável substituir o robot?

Resolução

a) Começamos por construir o Quadro 3 e calcular a terceira coluna.

Quadro 3 – Cálculo da função de intensidade de falha e de MTBF em cada momento de falha

Períodos (*i*)	***t***	**ln(*t*)**	***m*(*t*)**	**ρ(*t*)**	**MTBF**
1	1.339	7,199678	0,399278	0,000657	1523,154677
2	1.857	7,526718	0,820329	0,000973	1028,165264
3	2.307	7,743703	1,322720	0,001262	792,170284
4	3.329	8,110427	2,965697	0,001961	509,830803
5	3.792	8,240649	3,950424	0,002294	435,977099
6	3.891	8,266421	4,181068	0,002366	422,681273
7	5.541	8,619930	9,105623	0,003618	276,386933
8	5.646	8,638703	9,489856	0,003701	270,221725
9	5.726	8,652772	9,788433	0,003764	265,691232
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
26	8.958	9,100302	26,220304	0,006444	155,171647
27	9.034	9,108751	26,712582	0,006510	153,604255
28	9.104	9,116469	27,170422	0,006571	152,186070
29	9.318	9,139703	28,596487	0,006757	147,995686
30	9.523	9,161465	30,000000	0,006936	144,175531

Calculamos depois *a*, *b*, ρ e MTBF pelas Expressões 11, 12, 9 e 10, respectivamente.

$$\hat{b} = \frac{30}{(30-1).\ln(9.523) - 252,057} = 2,2017$$

Como $b > 1$, o processo é PNH e a ROCOF cresce, como é normal acontecer nestes casos em que o equipamento se degrada progressivamente.

$$\hat{a} = \frac{30}{9.523^{0,2017}} = 5,212.10^{-8}$$

Podemos agora construir as restantes colunas do Quadro 3. No momento da última falha (a trigésima), teremos:

$$\hat{\rho}(9.523) = (5,212.10^{-8})(2,2017)(9.523)^{0,2017-1} = 0,006936$$

$$\text{MTBF} = \frac{1}{0,006936} = 144,17 \text{ horas}$$

O gráfico da Figura 2 mostra a evolução crescente das falhas acumuladas $m(t)$ (quarta coluna do Quadro 3) ao longo do tempo t (segunda coluna Quadro 3).
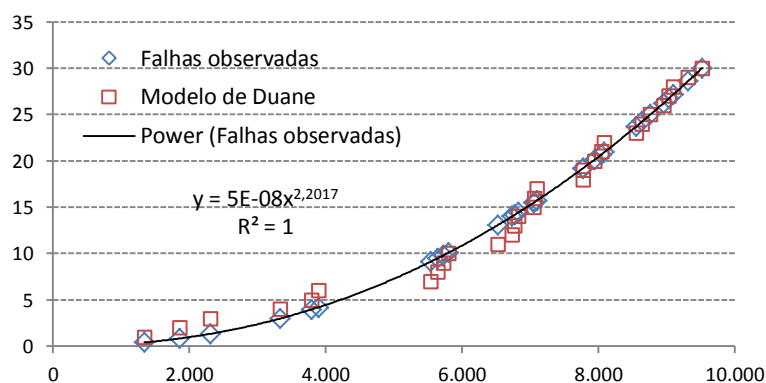
Figura 2 – Falhas acumuladas ao longo do tempo m(t)

Podemos ver estes valores de ρ e de MTBF na última linha das colunas sexta e sétima do Quadro 3. Podemos ver também que o número acumulado de falhas $m(t)$ em cada linha da quarta coluna é muito aproximadamente igual ao número que figura na mesma linha da primeira coluna.

b) Vejamos como determinar a vida económica do *challenger* e o momento da substituição do *defender*.

Calculamos os custos anuais uniformes das duas alternativas "Manter ou substituir o robot actual" para cada uma das sub-alternativas: "Adiar a substituição por mais 1, 2, 3, *n* anos até 5, no caso do robot actual e 1, 2, 3, *n* anos até 10, no caso do robot novo. Comparamo-los e tiramos conclusões.

Começando com o robot novo, os custos anuais uniforme serão os que podemos observar no Quadro 4.

Quadro 4 – Custos anuais uniformes do robot novo

Anos (i)	**Valor venal (€)**	**t (horas)**	**$m(t)$**	**$m(t_i\text{-}t_{i-1})$**	**CM (€)**	**CM actualizado (€)**	**Custo total uniforme (€/ano)**
1	32.000	1.920	0,88285	1	550	478	14.550
2	25.600	3.840	4,06135	3	1.650	1.248	13.759
3	20.480	5.760	9,91685	6	3.300	2.170	13.328
4	16.384	7.680	18,68329	9	4.950	2.830	13.085
5	13.107	9.600	30,53666	12	6.600	3.281	12.974
6	10.486	11.520	45,62008	15	8.250	3.567	12.958
7	8.389	13.440	64,05512	18	9.900	3.722	13.014
8	6.711	15.360	85,94795	22	12.100	3.956	13.161
9	5.369	17.280	111,39322	25	13.750	3.909	13.336
10	4.295	19.200	140,47650	29	15.950	3.943	13.557

Neste Quadro, CM representa o custo da manutenção e a linha 6, por exemplo, foi calculada do seguinte modo:

$40.000 \text{ x } (1 - 0,2)^6 = 10.486$ €
6 x 8 x 240 = 11.520 horas

$$\left(5{,}212.10^{-8}\right).\frac{(2{,}2017)}{(2{,}2017-1+1)}.11.520^{(2{,}2017-1+1)} = 45{,}62$$

45,62 – 30,54 ≅ 15
15 x 550 = 8.250 €
8.250 / (1 + 0,15)^6 = 3.567 €
[40.000 + (478 + 1.248 + ... + 3.567) – 10.486 x (1 + 0,15)^6] x (A/P;15%;6) = 12.958 €/ano

Observando o Quadro 4, constatamos que o custo anual uniforme será mínimo no sexto ano (vida económica) com 12.958 €/ano. Procedendo de igual modo para o robot actual, obtemos o Quadro 5.

Quadro* 5 – *Custos anuais uniformes do robot actual

Anos (i)	Valor venal (€)	t (horas)	$m(t)$	$m(t_i\text{-}t_{i\text{-}1})$	CM (€)	CM actualizado (€)	Custo total uniforme (€/ano)
1	9.600	11520	45,62008834	15	8.250	7.174	12.450
2	7.680	13440	64,05511691	18	9.900	7.486	12.827
3	6.144	15360	85,94795129	22	12.100	7.956	13.392
4	4.915	17280	111,3932233	25	13.750	7.862	13.894
5	3.932	19200	140,476505	29	15.950	7.930	14.454

A representação gráfica dos custos anuais uniformes das várias alternativas pode ser vista na Figura 3.
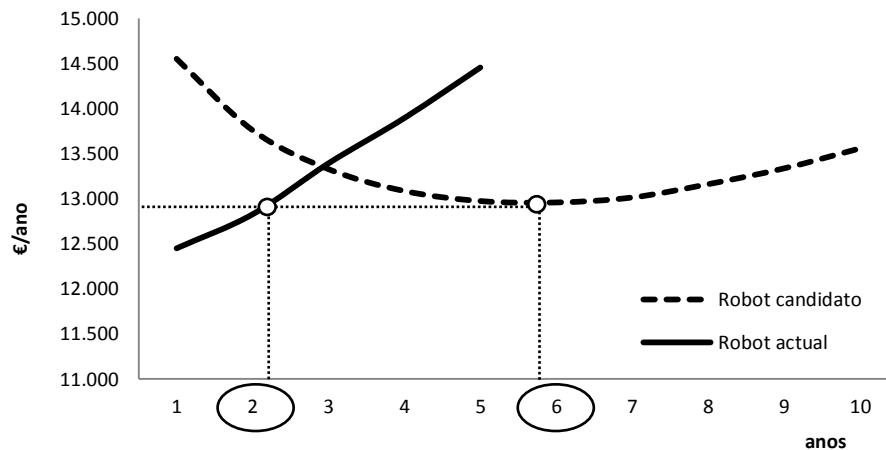
Figura* 3 – *Variação do custo anual uniforme com a idade dos robots

Podemos então concluir que será mais económico manter o robot actual por mais 2 anos e substituí-lo só nessa altura, pois até lá, o seu custo anual uniforme será de 12.827 €/ano, inferior ao custo anual uniforme mínimo proporcionada pelo robot novo 12.958 €/ano desde que, após a sua aquisição, o conservemos durante 6 anos, devendo ser substituído nessa altura. Este cálculo deve ser repetido sempre que um ou mais factores de custo ou os valores venais se alterem.

5. Conclusão

Sempre que temos de justificar economicamente a substituição de um equipamento devido a usura física, deparamo-nos quase sempre com insuficiência de dados sobre custos de O&M históricos e/ou suspeitas da sua incorrecção (sobretudo não separando OPEX de CAPEX). A literatura, tão pouco, proporciona informação sobre evolução típica destes custos. A descrição feita no ponto 1 é coerente e consistente com os raros dados conseguidos ao longo de anos. Assim sendo, a aplicação do modelo AMSAA merece algum cuidado pois, matematicamente, o número de falhas esperadas ao longo do ciclo de vida é sempre crescente – aliás conforme podemos constatar na 5ª coluna dos Quadros 4 e 5 – e não parece razoável que tal aconteça.

Estou convencido de que um equipamento que envelhece, mantido ou não preventivamente, apresenta custos anuais de manutenção crescentes durante uns anos (regime transitório) mas, progressivamente tende para um custo anual aproximadamente constante (entra em patamar – regime estacionário). Ou seja, o processo deixa de ser *Poisson* não-homogéneo (PNH) e passa a *Poisson* homogéneo (PH). Deste facto me apercebi ao analisar detalhadamente a evolução temporal dos dados do Quadro 2 e, em consequência, os tratei em [2], dividindo-os em duas partes – uma antes e outra depois das 8.000 horas. O impacto desta alteração no caso do robot visto no ponto 4, seria o de uma previsão de apenas 12 falhas entre os momentos 9.600 e 11.520 horas deduzidos a partir de uma função linear, em lugar de 15 falhas deduzidos a partir de uma função de potência (conforme podemos ver no Quadro 4) – uma diferença de 25%.

Referências bibliográficas

[1] Ebeling, Charles E., "*Reliability and Maintainability Engineering*", McGraw-Hill, 1997

[2] Assis, Rui, "*Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos*", LIDEL, 2010

[3] Sullivan, William G. et al. "*Engineering Economy*", PEARSON, 2011